

論文 高強度アンボンド主筋を用いたRC柱柱脚と十字型骨組の履歴性状

李 文聰*1・江崎 文也*2・中原 浩之*3・嘉村 健太郎*4

要旨: ラーメン構造の塑性後の残留変形をできるだけ押さえる目的で、プレキャスト化された構造部材を部材端定着部と高強度主筋で接合した中間層十字型骨組および最下層柱脚について、一定軸力下の正負交番繰返し水平力載荷実験を行った。その結果、残留変形をかなり小さくできること、梁の剛性と耐力を大きくすれば、残留変形が小さくなること、柱と梁の接合部のシアキーが残留変形に及ぼす影響はあまり見られないこと、柱脚部の横補強筋比が残留変形に及ぼす影響はほとんどないことがわかった。

キーワード: プレキャスト, 最下層柱脚, 十字型骨組, 高強度アンボンド主筋, 残留変形

1. 序

著者らは、大地震で塑性化したRC柱の残留部材角をできるだけ小さくするRC構造の開発を目指すために、主筋にアンボンド高強度鉄筋を用いたRC柱を提案し、一定軸力下の水平力載荷実験より残留変形がほとんど生じないことを明らかにした¹⁾。

実際の構造物への適用を考慮し、中間層の柱を想定して、一体的に打設した十字型骨組の実験を行った²⁾。その結果、柱・梁接合部の破壊が観察されたことから、接合部を補強した十字型骨組の実験を行った³⁾。その結果、柱のみでは見られなかった残留変形が生じ、接合部を補強した場合の方がわずかではあるが残留変形が小さいこと、骨組の残留層間変形角に占める柱・梁接合部の回転による残留変形の影響が大きいことが分かった。そこで本研究は、プレキャスト化を想定した構造を提案していることから、これまでの実験とは異なり、これまでより梁の剛性と耐力を大きくするとともにプレキャストした柱と梁を接合することによって中間層を想定した十字型骨組の実験を行い、架構の施工方法と梁の剛性・耐力が残留変形に及ぼす影響を検討した。また、文献3)によれば最下層柱脚部のコンクリートに圧壊現象が観察されたことから、柱脚部の適切な横補強配筋法を検討するため、最下層柱脚部の横補強法が残留変形に及ぼす影響を検討した。

本論は、これらの実験結果およびその検討について述べるものである。

2. 十字型骨組

2.1 試験体, 載荷方法および測定方法

図-1 に十字型骨組試験体形状を示す。文献3)によ

る実験結果から、文献3)の試験体の梁の断面(250mm×150mm)より大きく、また梁の長さ(1,100mm)より短くして剛性と耐力を強化した。RC試験体は、柱に通常用いられる強度の異形鉄筋を用いて柱と梁を一体的に打設した十字型骨組である。アンボンド試験体は、図-2に示す柱と梁を分離して製作し、柱および梁に埋め込んだ塩化ビニール管(図-2に破線で示す部分)にPC鋼棒を挿入し、主筋を柱の上下端に取り付けた主筋定着用H形鋼にナットを締め付けて定着し、梁と柱を接合した十字型骨組である。この接合法では柱と梁にずれが生じる可能

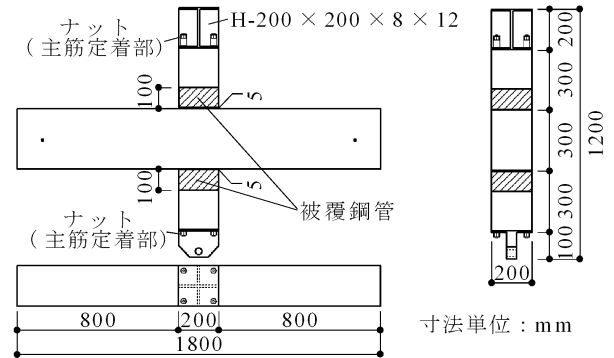


図-1 十字型骨組試験体形状

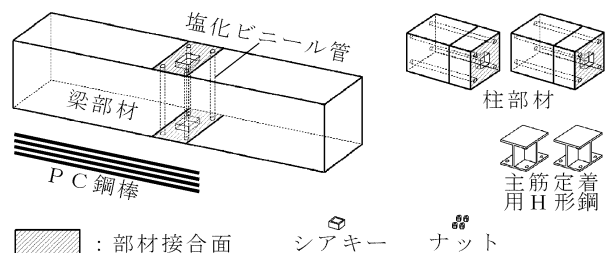


図-2 十字型骨組試験体の部材接合に使用する材料

*1 福岡大学 工学部建築学科助教 博士(工学)(正会員)

*2 福岡大学 工学部建築学科教授 工博(正会員)

*3 九州大学大学院 人間環境学研究院准教授 博士(工学)(正会員)

*4 (株)間組

表-1 試験体一覧

試験体名	柱断面積	柱主筋	柱帯筋(被覆鋼管以外の部分)	被覆鋼管	梁断面積	梁主筋	梁あばら筋
	$b \times D$				$b' \times d$		
IBT-2-0.15	200 × 200	4-D13($p_g=1.27\%$)	D6@30($p_w=1.07\%$)	□-200 × 200 × 2.3	200 × 300	上端筋, 下端筋とも 4-D19($p_{gb}=3.83\%$)	D6@50($p_{wb}=0.64\%$)
IUBT-2-0.15		4-13φ($p_g=1.33\%$)	D6@50($p_w=0.64\%$)				
IUBTS-2-0.15							

p_g : 柱主筋比, p_w : 柱帯筋比(鋼管部は帯筋無し), p_{gb} : 梁主筋比, p_{wb} : 梁あばら筋比 寸法単位 : mm

表-2 使用材料の力学的性質

(1) 鉄筋

種別	a (cm ²)	σ_f (MPa)	σ_u (MPa)	E_s (GPa)	ϵ_u (%) (試験片)
D6	0.32	378	535	185	14.1(JIS Z 2201の2号)
D13	1.27	353	521	182	26.7(JIS Z 2201の2号)
D19	2.47	446	690	203	16.2(JIS Z 2201の2号)
13φ	1.32	1210	1273	176	11.2(JIS Z 2201の2号)
PL-2.3		225	325	203	32.7(JIS Z 2201の5号)

a : 断面積, σ_f : 降伏強度, σ_u : 引張強さ, E_s : 鉄筋のヤング係数, ϵ_u : 破断伸び.

(2) コンクリート

	σ_B (MPa)	ϵ_c (%)	E_c (GPa)
各試験体	24.7	0.225	24.5

σ_B : シリンダー圧縮強度, E_c : コンクリートのヤング係数, ϵ_c : シリンダー圧縮強度時のひずみ.

性があるため、打設時に部材接合面の断面中央部に凹を成型し、シアキー(長さ20mmの□-40mm×40mm×2.3mmの鋼管にモルタルを充填したものを凹部分に埋め込んだ試験体を1体製作した。鉛直ジャッキによる一定軸力は、柱主筋に付着のある試験体では、柱軸応力度 σ_0 ($=N/(bD)$, N : 軸力, b : 柱幅, D : 柱せい)のコンクリート圧縮強度 σ_B に対する比が0.15となる大きさとした。付着の無い試験体では、ジャッキによる一定軸力を $\sigma_0/\sigma_B=0.1$ となる大きさとし、実験前にナットの締め付けにより主筋に $\sigma_0/\sigma_B=0.05$ となる大きさの緊張力を与えて、PC鋼棒の緊張力と合わせて水平力载荷前の一定軸力として付着のある試験体と同じ軸力比の $\sigma_0/\sigma_B=0.15$ となるようにし

た。柱のせん断スパン比 $M/(QD)$ (M : 部材の最大曲げモーメント, Q : 部材の最大せん断力, D : 部材のせい)の値は、いずれの試験体とも2である。表-1に試験体一覧を示す。試験体名は合計3体で、A-B-Cの3つの識別記号で示した。Aは、それぞれ、IBT:柱主筋として付着がある異形鉄筋を用いた試験体、IUBT:柱主筋として付着がない高強度鉄筋を用いた試験体、IUBTS:IUBT試験体にシアキーを埋込みした試験体を示す。Bは柱のせん断スパン比の値を、また、Cは柱の軸力比 σ_0/σ_B の値をそれぞれ示す。いずれの試験体とも柱頭・柱脚に柱せいの1/2の長さの鋼管を被覆している。表-2に十字型骨組試験体を使用した材料の力学的性質を示す。本実験では柱の曲げ降伏が先行する場合の挙動を検討しているので、柱の被覆鋼管部以外での帯筋比は柱のせん断破壊を確実に防ぐために決めた。梁の形状及び配筋は、いずれの試験体とも同じである。梁の配筋は柱頭及び柱脚の曲げ降伏が先行するように決めた。

図-3に示す加力装置を用いて、層間変形角 R を0.5%ずつ増加させ、3%まで各制御変位で3回繰返す一定軸力下の漸増変位振幅正負交番繰返し载荷を行った。制御層間変形角 R は、上階柱水平力载荷点の水平変位 δ を、下部柱端部ピン位置から水平力载荷位置までの高さ h で除した値 $R=\delta/h$ である。梁端部に埋め込んだボルトに取り付けた測定フレームに定着した変位計にて、柱の水平変位および接合部の回転変位を測定した。材軸方向の平均

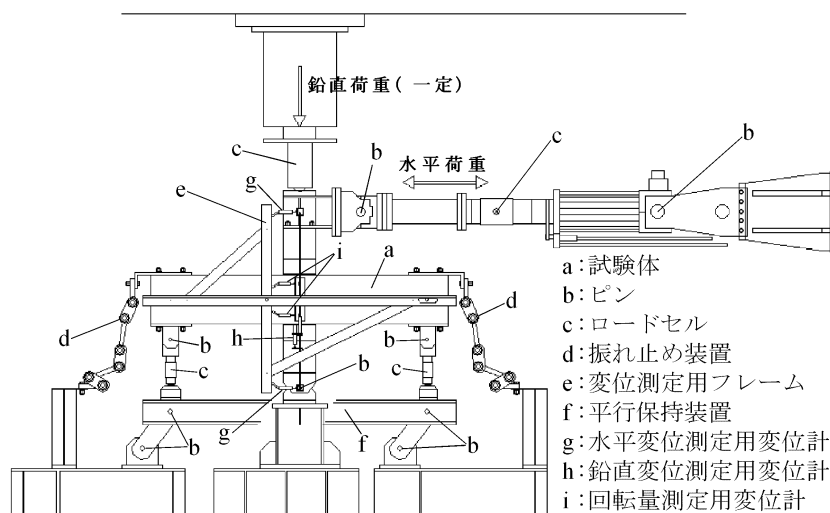


図-3 十字型骨組試験体の加力装置および測定装置

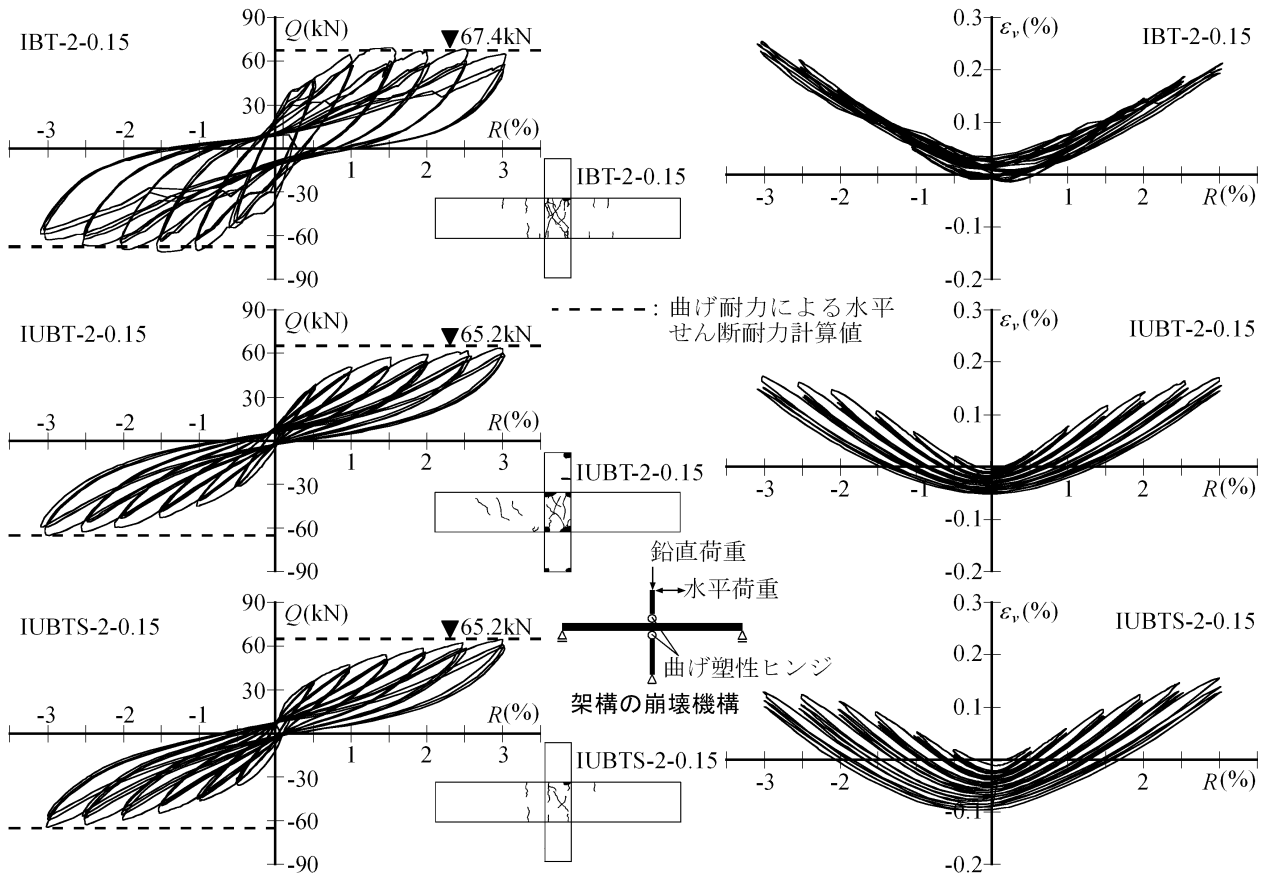


図-4 十字型骨組試験体の水平荷重 Q と層間変形角 R の関係、軸方向平均ひずみ ε_r と層間変形角 R の関係、実験終了時ひび割れ状況および架構の崩壊機構

ひずみ ε_r は図-3に示す正面及び後面の上階柱水平力載荷点(H形鋼の中央)から下部柱端部ピン位置の間に取り付けた鉛直変位測定用変位計の動きの平均値を、 h で除した値である。

2.2 実験結果

十字型骨組試験体の水平荷重 Q と R の関係、 ε_r と R の関係、柱せい面の実験終了時ひび割れ状況及び架構の崩壊機構を図-4に示す。 ε_r - R 曲線は、PC鋼棒の初期緊張力及び図-3に示す鉛直荷重載荷後の履歴曲線である。また、曲げ耐力による水平せん断耐力計算値は文献4)によった。柱主筋に付着のある試験体IBT-2-0.15は R が0.5%時に柱端部に曲げひび割れが生じた。 R が1%時を超えると柱・梁接合部にせん断ひび割れが発生した。アンボンド高強度主筋を用いた両試験体IUBT-2-0.15とIUBTS-2-0.15は R が1.5%を超えると柱材端部接合面の隙間が徐々に拡大するのみであった。

図-5に経験層間変形角 R_0 と残留層間変形角 R_r との関係を示す。通常のRC十字型骨組試験体IBT-2-0.15より高強度アンボンド主筋を用いた試験体の方が残留変形はかなり小さい。また、シアキーを埋め込むとわずかではあるが残留変形は小さいが、シアキーの残留変形に及ぼす影響はあまり見られず、本実験で採用した施工法で残

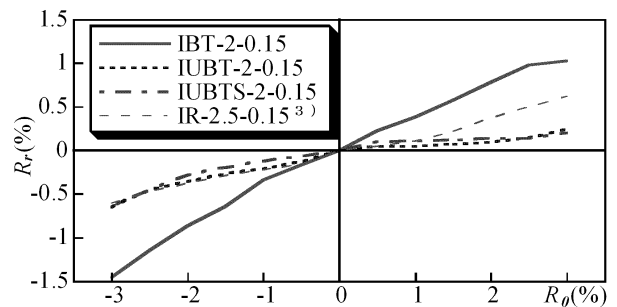


図-5 十字型骨組試験体の経験層間変形角 R_0 と残留層間変形角 R_r との関係

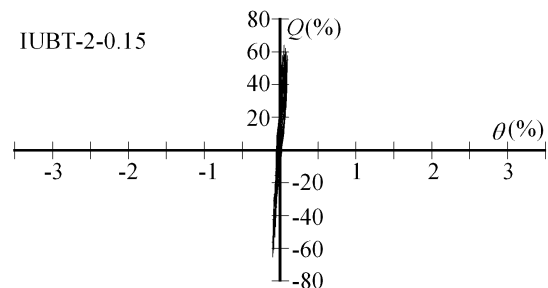


図-6 水平荷重 Q と回転角 θ との関係

留変形の小さい骨組とすることが可能であることが分かった。図-6に示す接合部の回転角 θ と水平荷重 Q の関

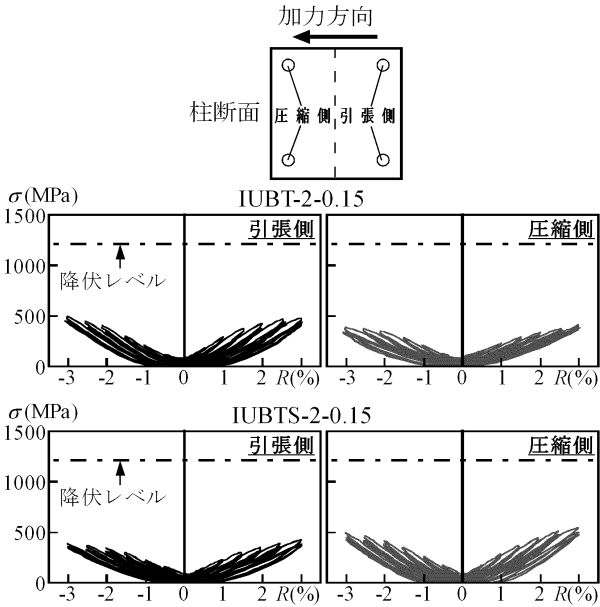


図-7 層間変形角 R とPC鋼棒の緊張応力度 σ の関係

係によると、接合部の回転による残留変形は、梁の剛性と耐力を強化したことでほとんど生じない結果となった。そのため、図-5に示す文献3)のIR-2.5-0.15試験体の場合より残留変形が小さくなっているものと思われる。

図-7にPC鋼棒の緊張力と層間変形角の関係を示す。これらによれば、 R の増大とともに柱の伸びが生じ、その結果いずれの主筋とも引張力が増大していることから、その反力が柱のコンクリートに軸圧縮力として作用していることになる。 R の増大とともに繰り返し回数が多くなると端部コンクリートの損傷により徐々に主筋の引張力が低下していることが認められる。

2.3 水平耐力

図-8に柱の軸方向力 N と曲げモーメント M の耐力曲線計算値と実験から得られた N と M の実験値との関係を表す。Aの曲線は被覆鋼管による拘束効果⁵⁾を考慮した

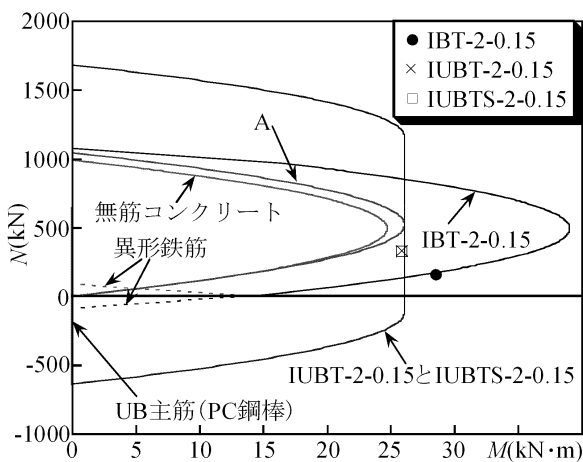


図-8 柱の軸力 N -曲げモーメント M 曲線と実験値の関係

曲げ耐力曲線を表す。これらの結果によれば、通常のRC柱及びアンボンドRC柱は、ほぼ累加耐力に達している。

3. 最下層柱脚

3.1 試験体

図-9に試験体形状を示す。片持柱と基礎梁で構成される最下層の柱高中央から柱脚までの柱を想定した試験体を計画した。柱は帯筋で横補強した試験体および柱脚部に柱せいの1/2の長さの鋼管で横補強し、その鋼管の厚さが2.3mmと6mmで横補強した試験体の合計3体製作した。施工方法は片持柱と基礎梁を分離して打設を行い、主筋に高強度鉄筋(以下、PC鋼棒と呼ぶ)を用いて、片持柱および基礎梁に埋め込んだ塩化ビニール管にPC鋼棒を挿入して、柱の上端に取り付けた主筋定着用H形鋼と加工した基礎梁にナットで締め付けることにより主

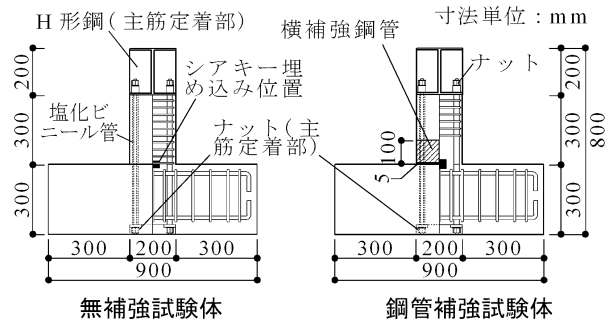


図-9 最下層試験体形状および配筋詳細

表-3 最下層試験体一覧

試験体名	2-0.15-n	2-0.15-t2.3	2-0.15-t6
柱脚部断面図			
柱横補強筋	D6@30 ($P_w=1.07\%$)	□-200×200 ×2.3($P_w=2.3\%$)	□-200×200 ×6($P_w=6.0\%$)
柱主筋	4-13φ($P_g=1.33\%$)		

■ シアキー埋め込み位置 ■ 横補強鋼管 寸法単位: mm

表-4 最下層試験体の使用材料の力学的性質

(1) 鉄筋

種別	a (cm ²)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	E_s (GPa)	ϵ_u (%) (試験片)
D6	0.32	378	535	185	14.1(JIS Z 2201の2号)
13φ	1.32	1210	1273	176	11.2(JIS Z 2201の2号)
PL-2.3		225	325	203	32.7(JIS Z 2201の5号)
PL-6		360	502	178	25.2(JIS Z 2201の5号)

a : 断面積, σ_y : 降伏強度, σ_u : 引張強さ, E_s : 鉄筋のヤング係数, ϵ_u : 破断伸び。

(2) コンクリート

	σ_B (MPa)	ϵ_c (%)	E_c (GPa)
各試験体	23.9	0.210	23.3

σ_B : シリンダー圧縮強度, E_c : コンクリートのヤング係数, ϵ_c : シリンダー圧縮強度時のひずみ。

筋を定着させて、片持柱と基礎梁を接合した。いずれの試験体とも、柱脚部および基礎梁断面にシアキー(40mm×40mm×20mm)の埋込みを行った。実験前にナットの締め付けにより主筋に緊張力を与え、緊張力は $\sigma_a/\sigma_B=0.05$ となる大きさとした。一定軸力は $\sigma_a/\sigma_B=0.1$ となる大きさとし、PC鋼棒の緊張力と合わせて $\sigma_a/\sigma_B=0.15$ となるようにした。柱のせん断スパン比 $M/(QD)$ の値は、いずれの試験体とも2である。表-3に試験体一覧を示す。試験体名は、イーローハの3つの識別記号で示した。イは柱のせん断スパン比の値を、また、ロは鉛直荷重とPC鋼棒の緊張力を合わせた柱の軸力比 σ_a/σ_B の値、ハは柱脚に横補強した鋼管の厚さ $t(\text{mm})$ を表しており、nは無補強の意味である。表-4に使用した材料の力学的性質を示す。柱せいの1/2の柱脚部以外の帯筋の配筋は、いずれの試験体とも同じとした。

3.2 実験結果

最下層試験体の水平荷重 Q と部材角 R の関係、材軸方向の平均ひずみ ε_r と R の関係、柱せい面の実験終了時ひび割れ状況及び架構の崩壊機構を図-10に示す。ただし、十字型骨組試験体と同様に、 ε_r - R 曲線は、PC鋼棒の初期緊張力および一定軸力載荷後の履歴曲線である。また、曲げ耐力による水平せん断耐力計算値は文献4)に

よった。いずれの試験体も主筋定着部のH形鋼近傍で圧壊が観察されたため、この部分を補強を行うことが望ましいようである。無補強の試験体2-0.15-nは、 $R=1.5\%$ を超えると一部カバーコンクリートの剥落が生じ、 $R=2\%$ を超えると基礎梁との境界部の一部圧壊が発生し、脚部と基礎梁の接合面に大きな隙間が生じた。鋼管補強した試験体2-0.15-t2.3と2-0.15-t6は $R=1.5\%$ 時を超えると、基礎梁との境界の隙間(写真-1参照)が拡大した。また、鋼管補強した両試験体の ε_r - R 曲線における軸縮みの進展は、無補強の試験体より小さくなった。実験終了後、取り出した柱材の脚部断面をみると、2.3mmの厚さで鋼管補強された試験体は、鋼管がはらんでいることが観察されたが、厚さ6mmで鋼管補強された試験体は、はらみは生じていなかった。この両試験体の鋼管を取り除いてコンクリートのひび割れ状況を観察した結果、圧壊時に見られるひび割れに類似した小さいひび割れが生じており、柱脚部のコンクリートの圧壊を鋼管が有効に拘束していることが分かった。

図-11に経験部材角 R_0 と残留部材角 R_r との関係を示す。図中には文献1)で実施した通常のRC柱の実験結果を合わせて示している。試験体BT-2-0.15は断面が200mm×200mm、せん断スパン比が2、一定軸力比が

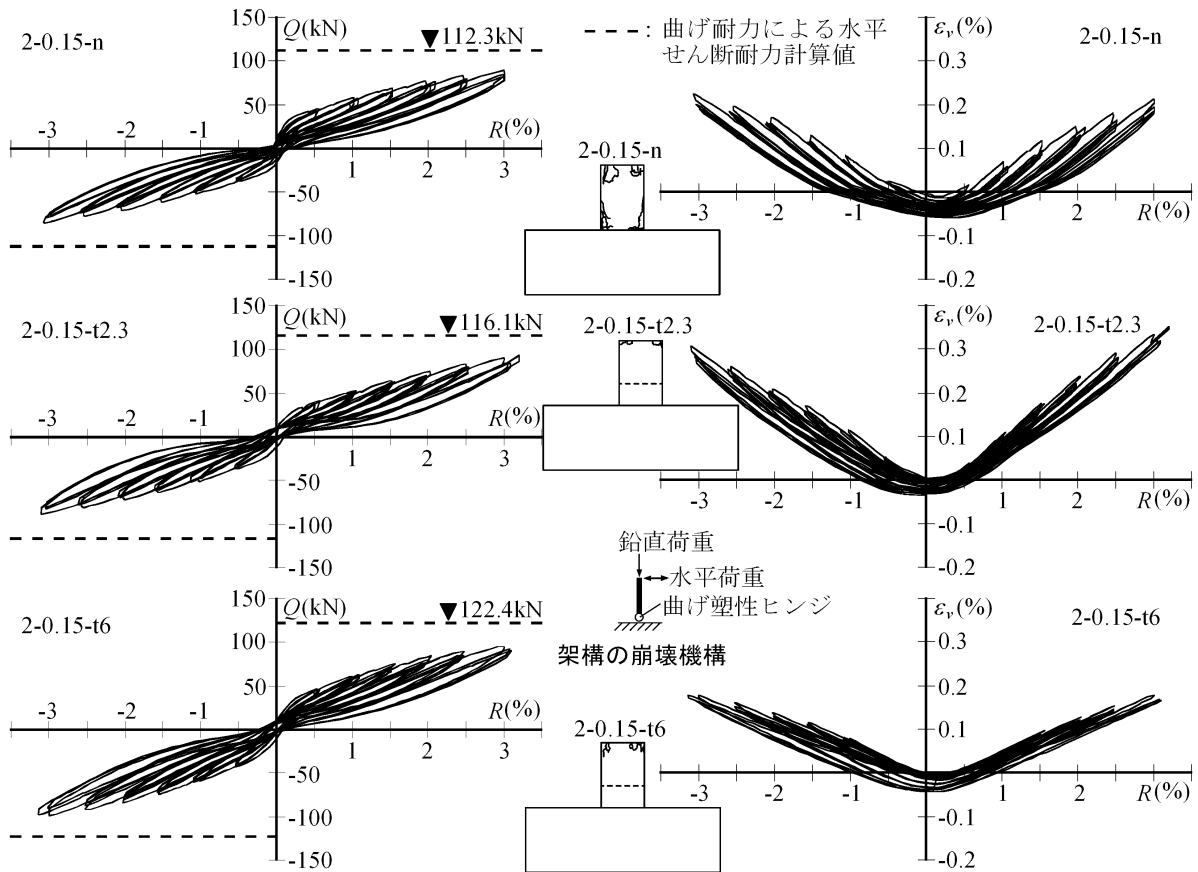


図-10 最下層試験体の水平荷重 Q と部材角 R の関係、軸方向平均ひずみ ε_r と部材角 R の関係、実験終了時ひび割れ状況及び架構の崩壊機構



写真-1 基礎梁と柱との境界の隙間 (2-0.15-t6)

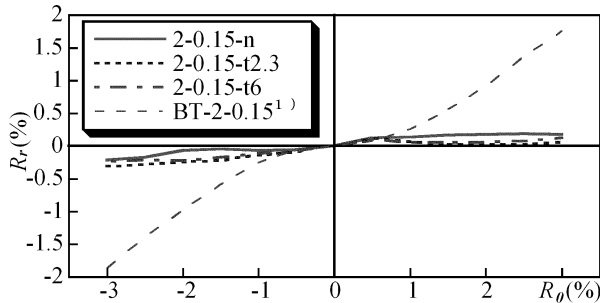


図-11 最下層試験体の経験部材角 R_0 と残留部材角 R_r との関係

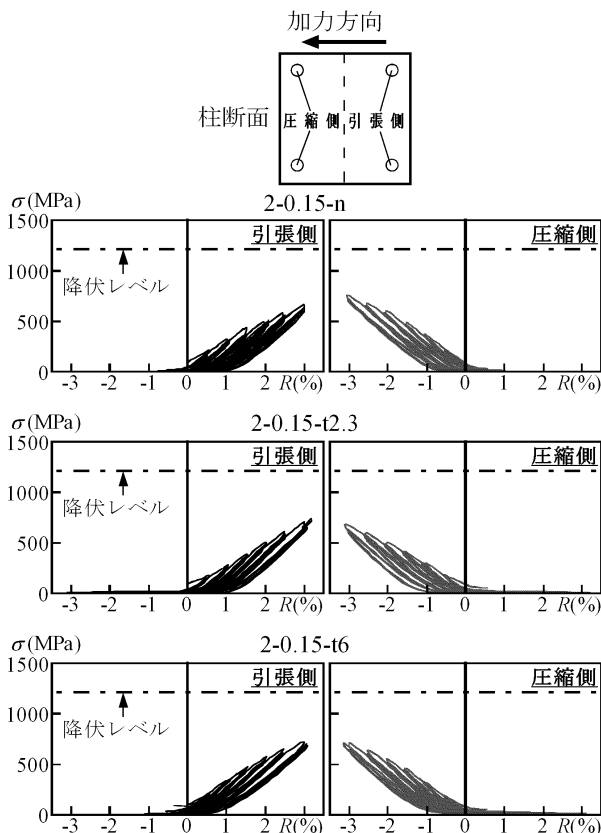


図-12 部材角 R と PC 鋼棒の緊張力との関係

0.15, 主筋にD13の鉄筋を6本配筋し、帯筋にD6の鉄筋を40mm間隔で配筋し、柱頭・柱脚に柱せいの1/2の長さの鋼管(厚さ2.3mm)で被覆した単独柱である。これらによれば、 R が増大してもほとんど残留変形が生じていないことがわかる。帯筋補強試験体の場合は、カバーコンクリートの一部剥離や軸縮みが他の試験体より多少大き

くなっているが、本実験の範囲では横補強筋の相違が残留変形に及ぼす影響は見られないようである。

図-12にPC鋼棒の緊張応力度と部材角の関係を示す。柱脚部は引張側になると R の増大とともに引張力が大きくなっている。一方、圧縮側になると R の増大とともに引張力が0に近づいている。これらの結果から柱脚部は主筋が曲げモーメントを負担していることがわかるが、 $R=3\%$ までは主筋は降伏していない。

4. 結論

中間層十字型骨組と最下層柱の一定軸力下の水平力載荷実験を行った結果、以下のことが分かった。

- 1) 付着のある通常のRC柱を有する場合よりアンボンド柱を有する場合のほうが残留変形が1/2以下となった。
- 2) 梁の剛性と耐力を大きくすれば、骨組の残留変形が小さくなった。
- 3) 柱と梁の接合部にシアキーを設けた方がわずかではあるが残留変形が小さくなったが、残留変形に及ぼす影響はあまりなかった。
- 4) 最下層柱の部材角が3%まで主筋は降伏しなかった。
- 5) 帯筋または鋼管などの横補強量の相違が残留変形に及ぼす影響はあまりみられなかった。
- 6) 本実験で採用したプレキャスト部材の接合法により残留変形の小さい骨組とする見通しが得られた。

謝辞: 本研究は平成18年度文部科学省科学研究費補助金 基盤研究(A) (課題番号: 18206060, 研究代表者: 崎野健治) の援助を受けた。試験体製作にあたっては、卒論を担当した福岡大学学部学生和田尚大, 豊原史子の各氏ほか研究室の卒論生の協力を得た。

参考文献:

- 1) 田中 睦, 江崎文也, 小野正行, 河本裕行: 高強度アンボンド主筋を用いたRC柱の履歴性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 2, pp. 181-186, 2004
- 2) 鄭 眞安, 嘉村健太郎, 江崎文也, 小野正行: アンボンド高強度主筋を用いたRC柱で構成された中間層十字型架構の履歴性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 2, pp. 157-162, 2006
- 3) 嘉村健太郎, 江崎文也, 李 文聰, 中原浩之: 自己修復性のあるプレキャスト十字型骨組の履歴性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 3, pp. 133-138, 2007
- 4) 田中 睦, 江崎文也, 小野正行: アンボンド高強度主筋を用いたRC柱で構成された最下層十字型架構の履歴性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 2, pp. 283-288, 2005
- 5) 崎野健治, 孫玉平: 直線型横補強材により拘束されたコンクリート-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第461号, pp. 95-104, 1994